

文章编号:1007-9629(2021)05-1089-07

基于通电退化的再生混凝土中钢筋可靠性评估

陈克凡^{1,2}, 乔宏霞¹, 王鹏辉¹, 彭宽¹, 朱翔琛¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 重庆重交再生资源开发股份有限公司, 重庆 401122)

摘要:为了评估阻锈剂对再生混凝土中钢筋的保护作用,设计了钢筋再生混凝土恒电流通电加速锈蚀试验,对再生混凝土中钢筋进行电化学试验,分析钢筋极化曲线及交流阻抗,计算钢筋腐蚀电流密度,并以腐蚀电流密度作为损伤变量,运用 Weibull 分布函数建立再生混凝土中钢筋的可靠度函数. 钢筋通电加速试验后,对钢筋进行微观形貌观测. 结果表明:随着通电时间的增加,未掺阻锈剂的再生混凝土试件中钢筋表面出现颗粒状的锈蚀物;掺加阻锈剂的再生混凝土试件中钢筋表面出现大量的微裂纹;可靠度为 60% 时未掺和掺加阻锈剂试件中钢筋失效时间分别为 880、2 060 h,阻锈剂可以使再生混凝土使用寿命延长至原来的 2.34 倍.

关键词:阻锈剂;通电加速锈蚀;极化曲线;交流阻抗;可靠度

中图分类号:TU528.571

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.026

Reliability Evaluation of Steel Bars in Recycled Concrete Based on Corrosion by Electric Current

CHEN Kefan^{1,2}, QIAO Hongxia¹, WANG Penghui¹, PENG Kuan¹, ZHU Xiangchen¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Chongqing Zonjo Reclaimed Resources Development Co.,Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: In order to evaluate the protective effect of corrosion inhibitor on steel bars in recycled concrete, the constant current electrification accelerated corrosion test of reinforced recycled concrete was designed. The electrochemical test was carried out on the steel bars in concrete. The polarization curve and AC impedance of steel bars were analyzed, and the corrosion current density was calculated, which was taken as the damage variable. The reliability function of steel bars in recycled concrete was established by using Weibull distribution. After electrochemical test, the micro-morphology of the steel bars was analyzed. The results show that with the increase of power on time, granular corrosion products appear on the surface of steel bars in recycled concrete, while a large number of micro cracks appear on the surface of steel bars in recycled concrete with corrosion inhibitor. With reliability of 60% the failure time of steel bars in recycled concrete without and with corrosion inhibitor is 880, 2 060 h respectively. Corrosion inhibitor can prolong the service life of recycled concrete by 2.34 times the original.

Key words: corrosion inhibitor; electrification accelerated corrosion; polarization curve; AC impedance; reliability

20 世纪以来,钢筋混凝土结构成为世界上应用最为广泛的结构形式^[1]. 虽然钢筋混凝土结构具有可

收稿日期:2020-06-15; 修订日期:2020-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51468039,51868044)

第一作者:陈克凡(1985—),男,陕西宝鸡人,兰州理工大学博士生. E-mail: ckflut@qq.com

通讯作者:乔宏霞(1977—),女,山西应县人,兰州理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail: qiaohongxia@lut.edu.cn

模性好、整体性好、耐火性好等优点,但是不可否认的是其抗裂性能较差^[2],钢筋锈蚀导致混凝土产生裂缝^[3],容易降低整个建筑物的安全性能.因此,应及时掌握钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀状态,采用合理有效的方法对钢筋进行保护.

分析混凝土中钢筋锈蚀情况,对研究钢筋混凝土结构使用寿命非常重要.刘洋^[4]验证了脉冲预泵浦布里渊光时域分析(PPP-BOTDA)分布式光纤传感技术用于钢筋锈蚀实时、无损、分布式监测的可行性;刘栋^[5]研发了一种可用于混凝土内监测钢筋锈蚀的固态参比电极;Puzanov等^[6]提出通过测定混凝土电阻率来进行钢筋锈蚀状况评估的无损检测方法;Zivica^[7]在1993年提出了一种通过开发“腐蚀传感器”改进的电阻法检测混凝土中钢筋锈蚀状态;Zivica^[8]在2000年研究了电阻法在监测混凝土中钢筋状态及其变化率中的应用,并采用动电位法获得了钢筋锈蚀的定量数据.

采用合理有效的防护措施,可以延长钢筋混凝土结构使用寿命.张晏清^[9]发现钢筋表面涂布防护涂层有助于改善钢筋防腐性能;周欣等^[10]发现山梨醇与二乙烯三胺缩聚物(SDC)的加入可有效降低碳钢的腐蚀电流密度,提高碳钢的点蚀电位;徐强等^[11]发现纳米硅渗透型防护剂处理的砂浆表面呈现明显类核壳结构点坑,处理6h后混凝土氯离子电通量可降低50%以上;乔宏霞等^[12-13]发现涂层技术可以减缓氯氧镁水泥混凝土中钢筋的锈蚀速率,明显有利于钢筋的防锈;缪昌文等^[14]发现羧酸铵能显著减少碱性环境中氯盐对钢筋钝化膜的破坏,对钢筋混凝土起到良好的保护作用;Glass等^[15]和Hassanein等^[16]认为外加电流阴极法是抑制钢筋混凝土结构中氯离子

腐蚀的有效手段,并且是修复受氯污染钢筋混凝土的一种持久方法.

综上,国内外诸多学者对于钢筋锈蚀状态及防护技术进行了大量研究,但是,对于钢筋再生混凝土中钢筋的研究较少^[17-18].本文选用钢筋再生混凝土及掺加阻锈剂的钢筋再生混凝土为研究对象,通过恒电流通电加速锈蚀试验,分析钢筋的极化曲线及交流阻抗等,运用Weibull分布函数对再生混凝土中钢筋的可靠度进行评估.

1 试验

1.1 原材料

甘肃省祁连山水泥厂生产的P42.5普通硅酸盐水泥;兰州某商砼公司提供的堆积密度为1569 kg/m³的碎石以及堆积密度为1639 kg/m³的中砂;甘肃德隆生态有限公司生产的最大粒径为31.5 mm,堆积密度为1423 kg/m³的再生粗骨料;甘肃省兰州市某外加剂公司提供的聚羧酸系高效减水剂,掺量¹⁾为3%;复合型混凝土阻锈剂,掺量为4%;甘肃酒钢集团生产的直径12 mm的HRB335钢筋.

1.2 试验方案

再生混凝土配合比见表1.拌制的再生混凝土坍落度为90 mm.将钢筋表面的杂质处理干净,制成尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的2组钢筋再生混凝土试件,第1组试件为再生混凝土(RC)组,第2组试件为掺加阻锈剂的再生混凝土(RC-R)组,阻锈剂能在钢筋表面形成一层分子化学保护膜,对已经发生锈蚀或未发生锈蚀的钢筋进行保护.利用科斯特电化学工作站测试2组试件初始极化曲线及交流阻抗.

表1 再生混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of recycled concrete

Group	Cement	Aggregate	Sand	Recycled coarse aggregate	Water	Water reducer	Corrosion inhibitor
RC	424.00	933.60	614.00	233.40	180.00	16.02	0
RC-R	424.00	933.60	614.00	233.40	180.00	16.02	16.96

本文采用湿盐砂通电方案,将埋入砂土中的钢筋混凝土作为阳极,直径12 mm的石墨碳棒作为阴极,选用量程为5 V和3 A的PS-3002D-II型直流电源进行恒电流通电.配制质量分数为5%的NaCl与质量分数为5%的MgSO₄复合盐溶液,对砂土进行喷洒,用来模拟西部盐渍土环境.在通电过程中不定期对砂土洒水,采用土壤湿度检测仪控制砂土湿度,

确保通电过程中砂土湿度适中一致;同时定期喷洒复合盐溶液,以保证腐蚀离子浓度,通电加速锈蚀试验示意图如图1所示^[19].48 h为1个通电加速锈蚀试验循环,测试钢筋极化曲线及交流阻抗,根据三参数极化曲线方程式(式(1))计算钢筋的腐蚀电流密度 i_{cor} ,根据文献[20]中腐蚀电流密度与腐蚀状态之间的关系(见表2)分析钢筋的锈蚀状态.在通电288 h

1)本文涉及的掺量均为质量分数.

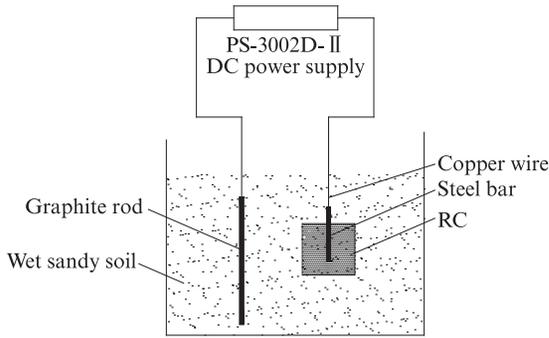


图1 通电加速锈蚀试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrification accelerated corrosion test

表2 钢筋腐蚀电流密度与锈蚀状态之间的关系^[20]

Table 2 Relationship between corrosion current density and corrosion state of steel bars^[20]

$i_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	Corrosion state
<0.1	Passive condition
0.1-1.0	Moderate corrosion rate
1.0-10.0	High corrosion rate
10.0-100.0	Very high corrosion rate

时,停止试验,取出混凝土中钢筋,对锈蚀钢筋进行扫描电镜(SEM)观测。

$$i = i_{corr} \left(\exp \frac{\Delta E}{\beta_a} - \exp \frac{-\Delta E}{\beta_c} \right) \quad (1)$$

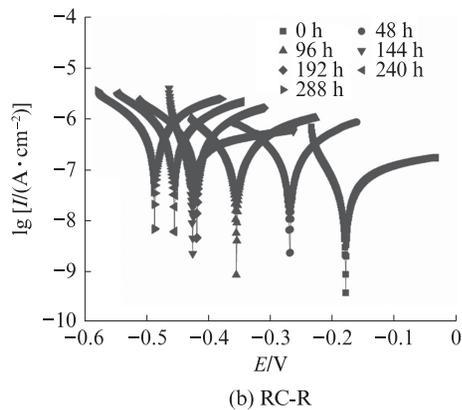
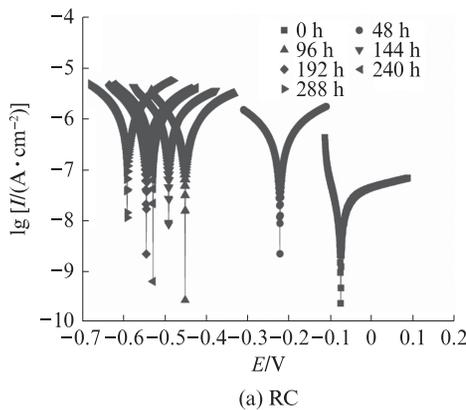


图2 再生混凝土中钢筋的极化曲线

Fig. 2 Polarization curves of steel bars in recycled concrete

图3给出了再生混凝土中钢筋腐蚀电流密度.结合图3和表2可以看出:2组试件钢筋腐蚀电流密度均随着通电时间的增加不断增加,RC组试件腐蚀电流密度增加速率先快后稳再快,RC-R组试件腐蚀电流密度增加速率较慢且稳定;2组试件在通电48 h后钢筋腐蚀电流密度分别为0.278 3、0.145 6 $\mu A/cm^2$,均进入中等腐蚀状态;通电288 h后,RC组试件钢筋腐蚀电流密度为0.901 6 $\mu A/cm^2$,即将进入高腐蚀状态,而由于阻锈剂对钢筋的保护作用,RC-R组试件

式中: i 为外测极化电流密度; ΔE 为极化电位; β_a 为阳极 Tafel斜率; β_c 为阴极 Tafel斜率.

2 试验结果与分析

2.1 极化曲线

图2为再生混凝土中钢筋的极化曲线图.从图2(a)可以看出:RC组试件中钢筋在未通电时,腐蚀电位为-0.08 V左右;随着通电时间的增加,腐蚀电位逐渐向负极移动,表明腐蚀容易发生;在通电192 h后,腐蚀电位向正极移动,这是由于钢筋表面形成的锈蚀层阻挡了钢筋和氧气的直接接触,抑制了钢筋的腐蚀;而在通电240 h后,腐蚀电位又朝着负极移动,这是由于钢筋锈蚀层在混凝土中不断扩散,导致钢筋与氧气又发生接触,钢筋进一步腐蚀.由图2(b)可见:RC-R组试件中钢筋在未通电时,腐蚀电位为-0.19 V左右;随着通电时间的增加,腐蚀电位整体向负极移动;在通电144 h后,腐蚀电位达到-0.42 V;此后,腐蚀电位略向正极移动,说明腐蚀较难发生,这是由于阻锈剂的加入,使得钢筋表面形成一层氧化层,隔断了钢筋与氧气的接触;在通电192 h后,腐蚀电位又朝着负极移动,这是由于钢筋锈蚀物将氧化层破坏,导致钢筋与氧气又发生接触,钢筋进一步腐蚀.

钢筋腐蚀电流密度为0.491 6 $\mu A/cm^2$,仍然处于中等腐蚀状态,虽然钢筋锈蚀产物在不断扩散,但阻锈剂在其表面形成的氧化层有效减缓了钢筋锈蚀速率.

2.2 交流阻抗

图4为RC组钢筋交流阻抗图.由图4(a)可见,随着通电时间的增加,Nyquist复数平面图在通电96 h时右移,但是整体趋势左移,极化阻抗不断减小,说明钢筋锈蚀在不断发生.高频区容抗弧半径的大小

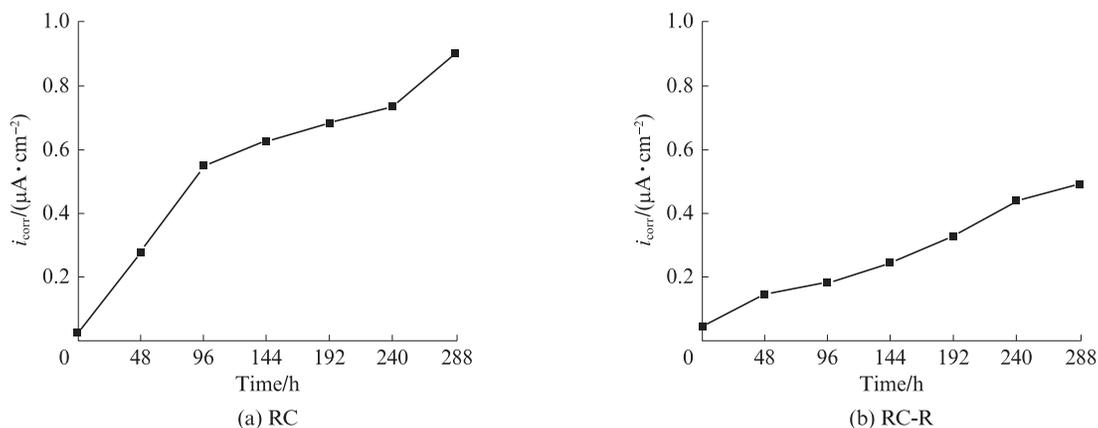


图3 再生混凝土中钢筋腐蚀电流密度

Fig. 3 Corrosion current density of steel bars in recycled concrete

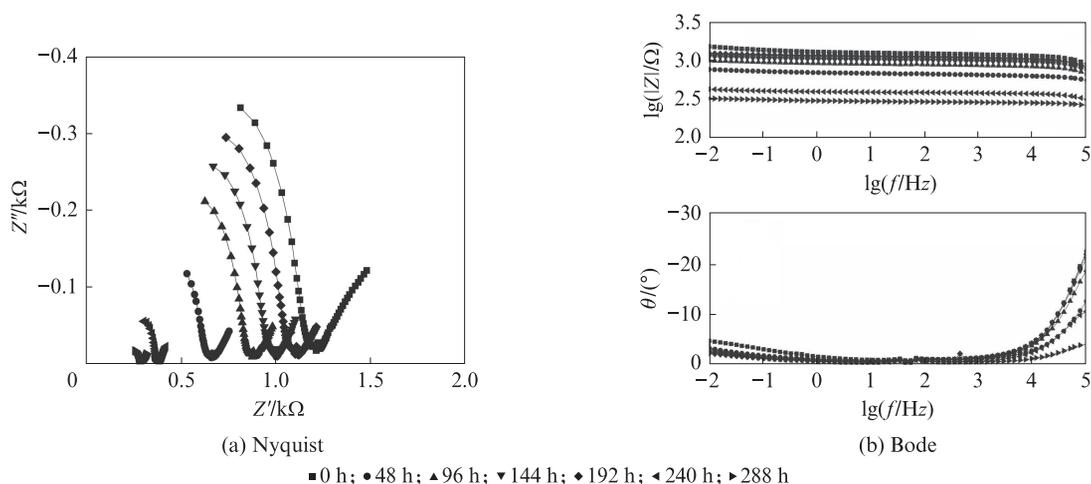


图4 RC组钢筋交流阻抗图

Fig. 4 AC impedance diagrams of steel bars in RC group

代表钢筋抵抗锈蚀的能力. 试件未通电时, 在高频区有1/2个半圆的容抗弧, 中频区有1个小的容抗弧, 此时钢筋抵抗锈蚀能力较强; 通电48 h时, 复数平面图左移, 高频区容抗弧变得不完整, 中频区有拖尾并逐渐变为直线, 此时钢筋正在发生锈蚀; 通电96 h时, 极化阻抗 $Z = Z' + jZ''$ 增加, 这可能是锈蚀产物在钢筋表面形成了部分锈蚀层, 导致极化阻抗增加; 这种现象一直持续到192 h, 此时极化阻抗开始不断减小. 由图4(b)可见, 在 $10^4 \sim 10^5$ Hz 高频区, 相位角 θ 存在1个峰, 即有1个时间参数(表征界面电容信息), 钢筋表面有腐蚀现象发生.

图5为RC-R组钢筋交流阻抗图. 由图5(a)可以看出: 随着通电时间的增加, 复数平面图整体趋势左移, 极化阻抗不断减小, 说明钢筋锈蚀在不断发生; 试件未通电及通电48 h时, 在高频区有1个半圆的容抗弧, 低频区有1个小的容抗弧, 此时钢筋抵抗锈蚀能力较强; 通电96 h时, 复数平面图左移, 高频区容抗弧变得不完整, 只有大约1/2个半圆的容抗弧, 且

低频区有拖尾并逐渐形成小的容抗弧, 此时钢筋正在发生锈蚀, 这种现象一直持续到288 h. 由图5(b)可以看出: 通电0、48、192 h时, 在 $10^4 \sim 10^5$ Hz 高频区, 相位角存在1个峰, 即有1个时间参数, 通电96、144、240、288 h时, 除了在 $10^4 \sim 10^5$ Hz 高频区相位角存在1个峰外, 在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ Hz 低频区相位角也有1个完整的峰, 即有2个时间参数, 表明钢筋表面及氧化层表面均有腐蚀现象发生.

分析可知钢筋混凝土体系有1~2个时间参数, 等效电路拟合如下:

①1个时间参数:

$$Z = (j\omega Q_{s,c} + R_{s,c}^{-1})^{-1} + (j\omega Q_{cr/c} + R_{cr/c}^{-1})^{-1} \quad (2)$$

②2个时间参数:

$$Z = Q_w + (j\omega Q_{s,c} + R_{s,c}^{-1})^{-1} + (j\omega Q_c + R_c^{-1})^{-1} + (j\omega Q_D + R_i^{-1})^{-1} \quad (3)$$

式中: ω 为角频率; R_c 为初始氧化层阻抗; Q_c 为初始氧化层电容; $R_{s,c}$ 、 $Q_{s,c}$ 分别为溶液与再生混凝土串联

的阻抗和电容; $R_{Cr/C}$ 、 $Q_{Cr/C}$ 分别为钢筋锈蚀层或阻锈剂氧化层的阻抗和电容; R_i 为阻锈剂氧化层腐蚀反应

的电荷转移阻抗; Q_D 为阻锈剂氧化层表面的双电层电容; Q_w 为 Warburg 阻抗。

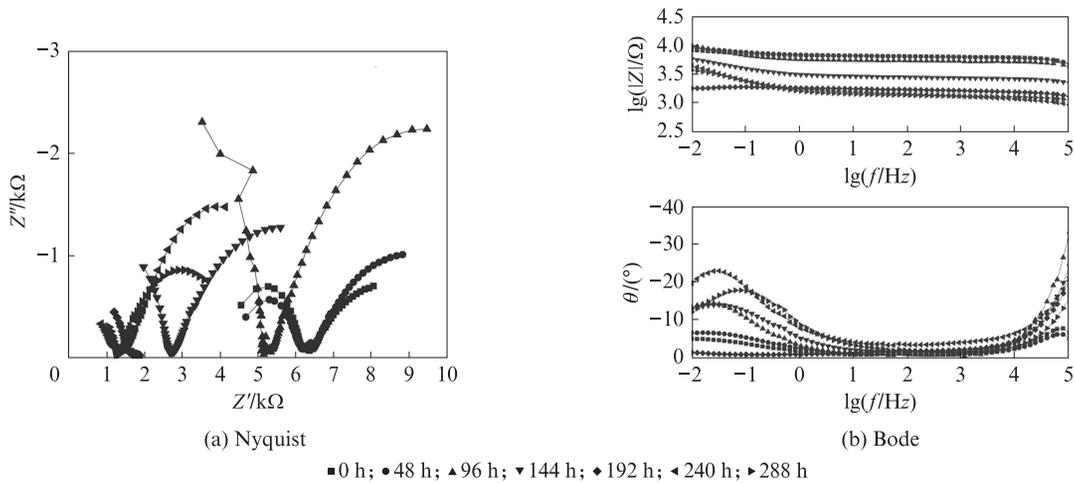


图5 RC-R组钢筋交流阻抗图
Fig. 5 AC impedance diagram of steel bars in RC-R group

2.3 锈蚀钢筋微观特征及锈蚀机理

图6为再生混凝土中钢筋的SEM图.从图6可以看出:RC组试件中钢筋表面的锈蚀较严重,能明显看到直径较大的锈坑,并且锈蚀物呈现颗粒状,分

布较广;RC-R组试件中钢筋表面的锈蚀较轻微,表面呈现网格裂纹状,伴随着出现大量的微裂纹,有部分直径较小的锈坑,这有可能是阻锈剂产生的氧化层被内部钢筋锈蚀物破坏所致。

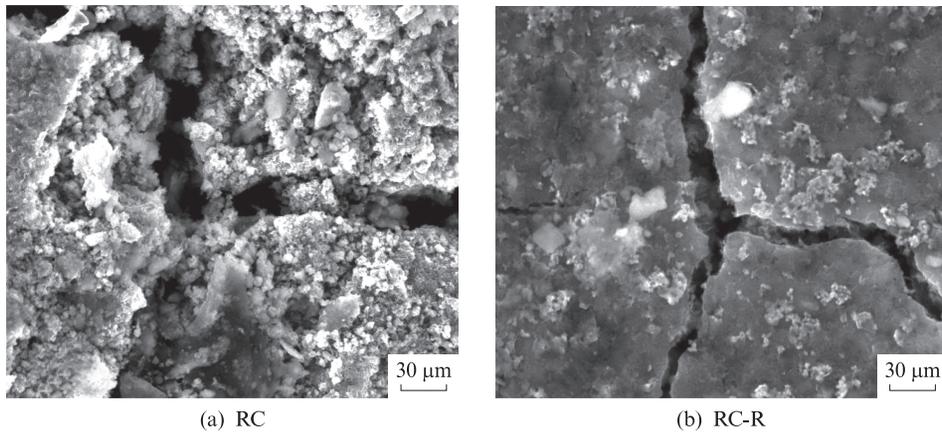


图6 再生混凝土中钢筋的SEM图
Fig. 6 SEM micrographs of steel bars in recycled concrete

3 钢筋可靠度函数

在可靠度统计分析中,Weibull分布因其在对小样本数据的预测中具有精确度高的特点而被广泛应用^[21-23].本文采用两参数 Weibull 分布来获取再生混凝土钢筋退化参数.首先验证钢筋腐蚀电流密度能否服从 Weibull 分布,并估算其形状参数和尺度参数,建立钢筋可靠度函数 $R(t)$:

$$R(t) = -\exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^m\right] \quad (4)$$

式中: R 为可靠度; t 为通电时间; m 为形状参数,表示密集程度; β 为尺度参数。

图7为钢筋腐蚀电流密度概率(P)图.从图7可以看出,2组试件中钢筋的腐蚀电流密度均位于95%的置信区间内,计算可得概率 $P > 0.05$,表明钢筋腐蚀电流密度服从 Weibull 分布。

4 可靠性评估

本文以钢筋腐蚀电流密度的变化作为钢筋损伤变量 D :

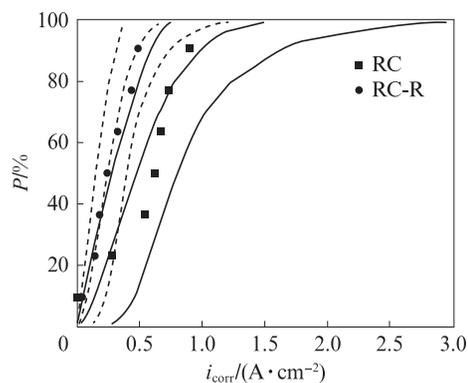


图7 钢筋腐蚀电流密度概率图

Fig. 7 Probability diagram of corrosion current density of steel bars

$$D = 1 - \frac{i_{\text{corr},t}}{i_{\text{corr},N}} \quad (5)$$

式中： $i_{\text{corr},t}$ 为通电 t 时间的腐蚀电流密度； $i_{\text{corr},N}$ 为腐蚀电流密度的阈值。根据表2，定义高腐蚀状态为其阈值，故 $i_{\text{corr},N}=10.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

用钢筋损伤变量计算退化量 ω_0 ，取钢筋的锈蚀程度为60%时达到钢筋破坏阈值^[24]。

$$\omega_0 = \frac{D - 0.6}{0.4} \quad (6)$$

本文利用最小二乘法计算形状参数和尺度参数。将其代入式(4)，得到再生混凝土中钢筋的可靠度曲线，如图8所示。

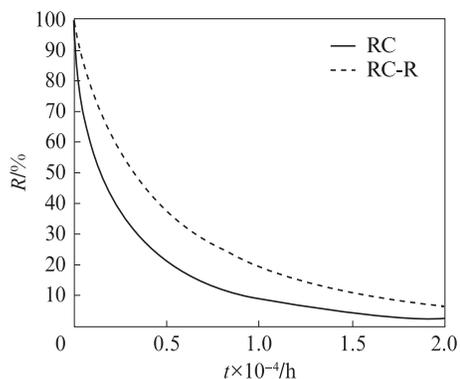


图8 再生混凝土中钢筋的可靠度曲线

Fig. 8 Reliability curves of steel bars in recycled concrete

由图8可知：通电前期，RC组试件可靠度下降较快，而RC-R组试件可靠度下降较慢；可靠度为60%时RC组和RC-R组钢筋失效时间分别为880、2060 h，表明添加阻锈剂后RC-R组混凝土可以有效地保护钢筋；RC-R组失效时间为RC组的2.34倍，即阻锈剂可使钢筋再生混凝土使用寿命延长至原来的2.34倍。

5 结论

(1)在288 h通电加速锈蚀试验后，添加阻锈剂的RC-R组钢筋腐蚀电流密度为 $0.4916 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，RC组钢筋腐蚀电流密度为 $0.9016 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。根据Bode图可以看出，RC组有1个时间参数，钢筋表面发生腐蚀，RC-R组有1~2个时间参数，通电初始阶段钢筋表面发生腐蚀，随着通电时间的增加，钢筋及阻锈剂氧化层表面均发生腐蚀。

(2)对比2组试件经过288 h通电加速锈蚀试验后钢筋的SEM图发现，RC组钢筋表面的锈蚀较严重，有颗粒状锈蚀物的出现，RC-R组钢筋表面呈现网格状裂纹，锈蚀较轻微。

(3)使用Weibull分布函数对再生混凝土中钢筋的可靠度进行评估，发现通电前期，RC组试件的可靠度下降速率较快，可靠度为60%时RC组和RC-R组钢筋的失效时间分别为880、2060 h，阻锈剂可使钢筋再生混凝土的使用寿命延长至原来的2.34倍。

参考文献：

- [1] 王传志. 钢筋混凝土结构理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
WANG Chuazhi. Theory of reinforced concrete structure [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1989. (in Chinese)
- [2] 韩素芳, 耿维恕. 钢筋混凝土结构裂缝控制指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
HAN Sufang, GENG Weishu. Guide for crack control of reinforced concrete structures [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 徐晓阳, 刘保县. 钢筋混凝土钢筋锈蚀研究综述[J]. 四川工业学院学报, 2003(3): 83-85.
XU Xiaoyang, LIU Baoxian. A survey of the research on reinforcement rustiness in concrete[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2003(3): 83-85. (in Chinese)
- [4] 刘洋. 基于光纤传感的钢筋锈蚀监测技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
LIU Yang. The research on monitoring technology of steel corrosion using fiber optic sensor[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- [5] 刘栋. 置于混凝土环境的钢筋锈蚀状态监测技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
LIU Dong. Study of monitoring technology of steel corrosion state placed in the concrete environment[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [6] PUZANOV A V, ULYBIN A V. Test methods of corrosion state of reinforced concrete structures (rus)[J]. Magazine of Civil Engineering, 2011, 25(7): 18-25.

- [7] ZIVICA V. Improved method of electrical resistance-A suitable technique for checking the state of concrete reinforcement [J]. *Materials and Structures*, 1993,26:328-332.
- [8] ZIVICA V. Utilisation of electrical resistance method for the evaluation of the state of steel reinforcement in concrete and the rate of its corrosion[J]. *Construction and Building Materials*, 2000, 14(6/7):351-358.
- [9] 张晏清. 钢筋表面防腐蚀涂层的性能[J]. *建筑材料学报*, 2005,8(5):577-579.
ZHANG Yanqing. Study of corrosion resistance coatings for steel bar [J]. *Journal of Building Materials*, 2005, 8 (5) : 577-579.(in Chinese)
- [10] 周欣,杨怀玉,王福会. 3.5% NaCl饱和Ca(OH)₂溶液中醇胺缩聚物对碳钢腐蚀的抑制[J]. *物理化学学报*, 2011,27(3):647-654.
ZHOU Xin, YANG Huaiyu, WANG Fuhui. Corrosion inhibition by sorbitol/diethylenetriamine condensation product for carbon steel in 3.5% NaCl saturated Ca(OH)₂ solution[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2011,27(3):647-654.(in Chinese)
- [11] 徐强,詹树林,张启龙,等. 海洋工程钢筋混凝土纳米硅渗透型防护剂的制备和性能[J]. *材料研究学报*, 2014,28(6):443-447.
XU Qiang, ZHAN Shulin, ZHANG Qilong, et al. Preparation and properties of nano-silicone marine reinforced concrete permeable protective coating[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2014, 28(6):443-447.(in Chinese)
- [12] 乔宏霞,巩位,王鹏辉,等. 硫酸盐环境氯氧镁水泥混凝土中钢筋防护试验[J]. *西南交通大学学报*, 2017,52(2):247-253.
QIAO Hongxia, GONG Wei, WANG Penghui, et al. Experimental study on steel reinforcement protection in magnesium oxychloride cement concrete under sulfate environment [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2017, 52 (2) : 247-253.(in Chinese)
- [13] 乔宏霞,巩位,关利娟,等. 盐湖地区氯氧镁水泥混凝土中钢筋涂层防护试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018,49(6):1533-1540.
QIAO Hongxia, GONG Wei, GUAN Lijuan, et al. Experimental study on coating protection of steel bar in magnesium oxychloride cement concrete in salt lake [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49 (6) : 1533-1540.(in Chinese)
- [14] 缪昌文,周伟玲,陈翠翠. 模拟混凝土孔溶液中有有机阻锈剂对钢筋的保护作用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010,40(增刊2):187-191.
MIAO Changwen, ZHOU Weiling, CHEN Cuicui. Protection of organic corrosion inhibitor to steel bar in simulated concrete pore solution[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010,40(Suppl 2):187-191.(in Chinese)
- [15] GLASS G K, PAGE C L, SERGI G. Developments in cathodic protection applied to reinforced concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2000, 12(1):8-15.
- [16] HASSANEIN A M, GLASS G K, BUENFELD N R. Protection current distribution in reinforced concrete cathodic protection systems[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2002, 24(1):159-167.
- [17] ZHAO Y X, DONG J F, DING H J, et al. Shape of corrosion-induced cracks in recycled aggregate concrete [J]. *Corrosion Science*, 2015, 98:310-317.
- [18] CORRAL-HIGUERA R, ARREDONDO-REA S P, NERIFLORES M A, et al. Chloride ion penetrability and corrosion behavior of steel in concrete with sustainability characteristics [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2011, 6 (4):958-970.
- [19] 冯琼,乔宏霞,朱彬荣,等. 湿盐砂环境下钢筋混凝土加速锈蚀试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2018,21(4):568-575.
FENG Qiong, QIAO Hongxia, ZHU Binrong, et al. Experimental study on accelerated corrosion of reinforced concrete in wet salt sand environment [J]. *Journal of Building Materials*, 2018,21(4):568-575.(in Chinese)
- [20] ERDOĞDU Ş, BREMNER T W, KONDRATOVA I L. Accelerated testing of plain and epoxy-coated reinforcement in simulated seawater and chloride solutions [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(6):861-867.
- [21] BEN ALI J, CHEBEL-MORELLO B, SAIDI L, et al. Accurate bearing remaining useful life prediction based on Weibull distribution and artificial neural network[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 56-57:150-172.
- [22] 董海鹰,黄巨朋,黄阿敏,等. 基于Weibull分布的牵引变电所保护系统寿命预测[J]. *高电压技术*, 2015, 41 (11) : 3569-3575.
DONG Haiying, HUANG Jupeng, HUANG Amin, et al. Life prediction for protection system of traction substation based on Weibull distribution[J]. *High Voltage Engineering*, 2015,41(11):3569-3575.(in Chinese)
- [23] ZHANG J P, ZHANG X, ZONG Y, et al. Life prediction for a vacuum fluorescent display based on two improved models using the three-parameter Weibull right approximation method [J]. *Luminescence*, 2018,33(1):34-39.
- [24] 王鹏辉,乔宏霞,冯琼,等. 氯氧镁水泥混凝土中涂层钢筋的耐久性退化研究[J]. *建筑材料学报*, 2020,23(3):563-571.
WANG Penghui, QIAO Hongxia, FENG Qiong, et al. Study on durability degradation of coated steel bar in magnesium oxychloride cement concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020,23(3):563-571.(in Chinese)